

# Exemple de caractérisation d'un aquifère karstique à l'aide des méthodes sismiques et des diagraphies acoustiques

J.-L. Mari, G. Porel

---

Ce chapitre est la traduction de l'article :

« *Contribution of seismic and acoustic methods to the characterization of karstic formations* »

Rédigé par Jean-Luc Mari et Gilles Porel.

Publié dans IFP Énergies Nouvelles e-books, Publications électroniques d'IFP Énergies Nouvelles (Signal processing for geologists and geophysicists, DOI: <https://doi.org/10.2516/ifpen/2011002>)

<http://books.ifpenergiesnouvelles.fr/ebooks/signal-processing/>

---

Ce chapitre de l'ouvrage *Sismique en forage et diagraphies acoustiques* est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC-ND permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© EDP Sciences, 2018

DOI: 10.1051/978-2-7598-2262-1.c007

## 5.1 Introduction

Au cours des dix dernières années, plusieurs aquifères souterrains ont été équipés afin d'en faire des sites expérimentaux. Ils sont conçus pour effectuer et calibrer des mesures in situ afin de suivre les débits et les réactions des réservoirs souterrains, hétérogènes par nature.

L'université de Poitiers (France) dispose d'un tel site hydrogéologique expérimental (HES), construit près du campus, dans le but de fournir des installations de surveillance à long terme et de réaliser des expériences visant à mieux comprendre les transferts dans les roches fracturées [2], [3], [4], [5].

Après un bref examen du contexte géologique, le document montre la contribution des méthodes sismiques et acoustiques pour la caractérisation d'un réservoir dans un calcaire karstifié. Les différentes méthodes géophysiques étudiées sont :

- méthode sismique de surface 3D ;
- méthodes sismiques de puits : mesures du bruit ambiant et profils sismiques verticaux (PSV) ;
- méthode acoustique : diagraphie acoustique en champ total.

Cet exemple montre l'avantage de combiner ces différentes méthodes géophysiques pour décrire les formations géologiques à différentes échelles, afin de détecter ici les zones karstifiées et quantifier les débits.

## 5.2 Contexte géologique

La formation aquifère étudiée est constituée d'un massif calcaire karstique du Jurassique moyen, présente entre 20 et 130 m de profondeur. Cet aquifère est localisé à proximité de la limite de partage des eaux, nommée « seuil Poitou », entre le bassin sédimentaire de Paris et celui de l'Aquitaine (figure 5.1). Le site expérimental (HES) couvre une superficie de 12 hectares sur laquelle 35 forages ont été réalisés à une profondeur de 120 m (figure 5.1). Il y a 150 millions d'années, le sommet du réservoir était initialement plat et horizontal, mais il a été érodé et altéré depuis, pendant la période du Crétacé et l'ère Tertiaire. Aujourd'hui, après 20 m de couverture, son toit forme des creux et des bosses avec une amplitude atteignant 20 m.

La phase de construction du site a commencé en 2002 et, jusqu'à présent, 35 forages ont traversé l'épaisseur totale du réservoir. La plupart de ces forages sont documentés à l'aide d'un log de fin de sondages et de diverses diagraphies : GR, température et acoustiques. En outre, deux forages ont été entièrement carottés.

Des études hydrogéologiques montrent que les taux de pompage maximaux varient de puits à puits et vont de 5 à 150 m<sup>3</sup>/h. Toutefois, l'aquifère réagit de façon assez régulière lors d'un essai de pompage. Ceci peut s'expliquer par un écoulement dans des conduits karstiques ouverts. La présence de drains karstiques est confirmée par les logs récents d'imagerie optique (OPTV) ou acoustique (BHTV). Presque tous

les forages ont montré des cavités et des conduits recoupés par les parois des trous de forage, avec parfois des ouvertures moyennes de 0,2-0,5 m.

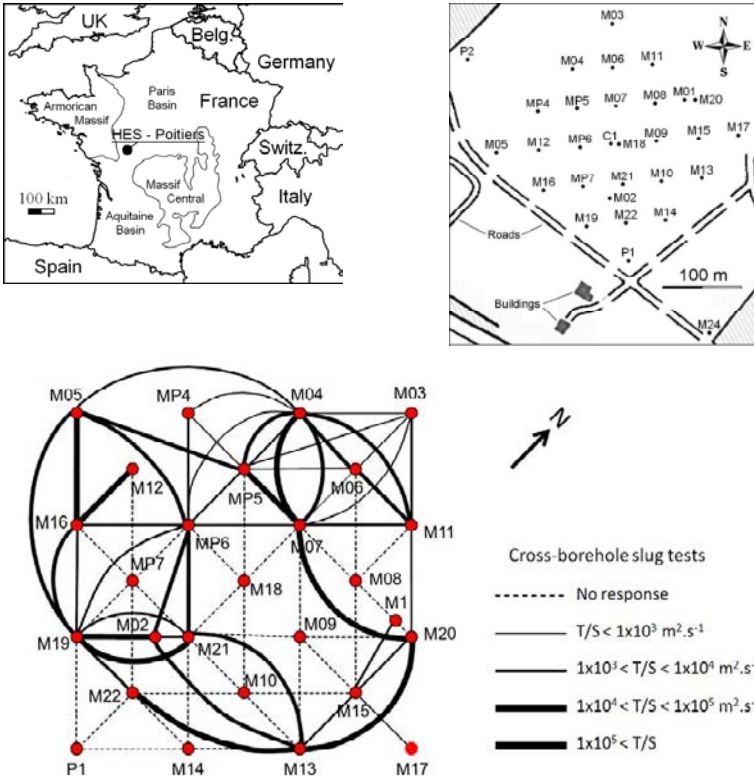


Figure 5.1 Site expérimental hydrogéologique à Poitiers. En haut : plan du site et localisation des forages. En bas : carte de diffusivité des slug tests.

Ces conduits sont majoritairement localisés dans trois niveaux horizontaux minces, à des profondeurs de 35, 88 et 110 m. Bien entendu, ces niveaux sont recoupés par des forages verticaux, ce qui entraîne une bonne connexion entre les puits et les drains karstiques. Cette connexion est principalement contrôlée par le degré d'ouverture des drains au voisinage du puits. Des tests hydrauliques (*slug tests*) montrent une propagation très rapide de l'onde de pression hydraulique sur de grandes distances (jusqu'à plus de 100 m). Ces observations ont permis de cartographier une distribution de diffusivité et les connexions importantes entre les puits (figure 5.1, en bas). Les connexions préférentielles sont visibles le long de la direction N90 (puits M13-M21-M22-M19 et puits M04-M06-M11). En fin de compte, il a été jugé crucial de mieux définir la géométrie du réservoir, d'une part, avec une résolution compatible avec l'échelle d'un forage et d'autre part, avec l'échelle du site entier. Les outils géophysiques à haute résolution semblent bien conçus pour entreprendre ce type d'approche.

### 5.3 Acquisition et traitement sismique 3D

En raison des limites de la zone d'étude, la longueur des profils sismiques ne pouvait dépasser 250 m. L'extension du site, dans la direction « crossline », perpendiculaire à la direction « inline » des profils est de 300 m. En conséquence, 20 profils ont été mis en œuvre, avec une distance de 15 m entre les lignes adjacentes.

La figure 5.2 (en haut à gauche) montre la carte avec la localisation des lignes sismiques et des forages. L'acquisition des données a été faite avec un enregistreur de 48 canaux et un seul géophone (10 Hz) par trace. La source était de l'explosif (25 g), ce qui facilite l'identification et la sélection des premières arrivées.

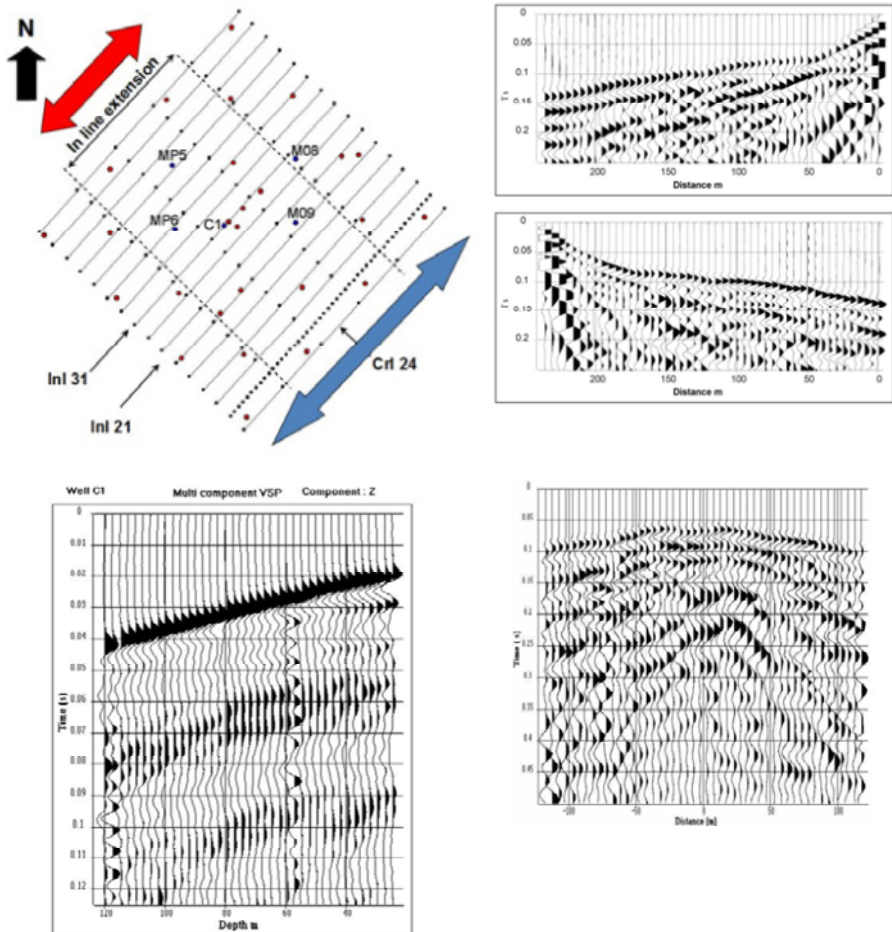


Figure 5.2 Acquisition sismique 3D. En haut à gauche : implantation des profils sismiques et des forages (points rouges). En haut à droite : exemple de tir bout en ligne, direct et inverse. En bas à gauche : profil sismique vertical (PSV) dans le forage C1. En bas à droite : exemple de point de tir perpendiculaire au profil (direction : crossline).

Une distance de 5 m entre deux géophones adjacents a été choisie pour éviter tout aliasing spatial. Un tir en bout direct et inverse a été enregistré par profil (tirs « inline »). La figure 5.2 (en haut à droite) montre un exemple de collection tir (directe et inverse) pour un profil « inline ». Trois tirs ont également été effectués transversalement à des distances de 40, 50 et 60 m de la ligne de réception considérée (tirs « crossline »). La figure 5.2 (en bas à droite) montre un exemple d'une collection tir (cross-line) ainsi obtenue. Les dépôts de la source ont été sélectionnés pour optimiser la qualité de l'image sismique sur l'intervalle de profondeur du réservoir, soit entre 40 et 130 m. La distance minimale de dépôt a été choisie égale à 40 m pour réduire l'influence des ondes de surface. Le pas d'échantillonnage est de 0,25 ms et le temps d'enregistrement est de 0,5 s.

La séquence de traitement a été décrite en détail dans différentes publications (Mari et Porel [1] et Mari et Delay [6]), elle sera donc brièvement exposée ici. Chaque collection tir a été traitée de façon indépendante pour obtenir une section sismique en couverture simple, avec un intervalle de 2,5 m (la moitié de la distance entre deux géophones adjacents). Le traitement d'une collection tir direct et inverse (inline) a permis d'obtenir une section sismique unique en couverture simple avec une extension de 240 m (indiquée par une flèche bleue sur la carte de localisation des lignes sismiques), tandis que la collection des tirs transversaux permet d'obtenir une section unique en couverture simple avec une extension en ligne de 120 m (indiquée par une flèche rouge sur la carte de localisation des lignes sismiques).

Une analyse des ondes réfractées par tomographie 3D [7] a été réalisée pour cartographier la forme irrégulière du toit du réservoir karstique et pour obtenir des corrections statiques et un modèle de vitesse de la couverture. Afin d'ajouter des informations dans la procédure d'inversion, nous avons utilisé simultanément les tirs en ligne et ceux avec un dépôt perpendiculaire de 60 m. Les tirs ont été sélectionnés afin d'avoir une onde réfractée comme onde de première arrivée quelle que soit la distance source récepteur. Les temps pointés des premières arrivées sismiques pour tous les tirs (inline et crossline), la carte de profondeur du sommet du réservoir (établie à partir des forages) et un modèle de vitesse [8] obtenu par la méthode Plus-Minus, sont des données d'entrée pour la procédure d'inversion. Les résultats d'inversion obtenus avec les données 3D soulignent les structures géologiques mentionnées précédemment [9] et permettent une meilleure reconnaissance de leurs alignements et de leur forme (zone de fractures). De plus, aucune cavité n'a été détectée près de la surface.

La séquence de traitement comprend : la récupération d'amplitude, la déconvolution, la séparation d'onde (méthode SVD pour l'extraction des ondes réfractées et la combinaison de la méthode SVD et F-K pour le filtrage des ondes de surface), les corrections statiques (obtenues par inversion tomographie) et les corrections « *Normal Move-Out* » (NMO). Un PSV a été enregistré dans le forage C1 (figure 5.2, en bas à gauche). Les données PSV ont été traitées pour obtenir une loi temps-profondeur et un modèle de vitesse. Le modèle de vitesse a été utilisé pour appliquer les corrections NMO puis migrer les données après sommation. La loi temps-profondeur du PSV a été également utilisée pour convertir les sections sismiques migrées obtenues en temps en sections en profondeur, avec un pas de 0,5 m. Les sections de profondeur en couverture simple ont été fusionnées pour créer le

bloc 3D. La largeur du bloc dans la direction des lignes est égale à 240 m et 300 m dans la direction transverse.

Dans le sens des lignes, l'abscisse zéro indique l'emplacement de la source. L'abscisse des points de réflexion varie entre -120 m et 120 m dans la direction des lignes. La distance entre deux points réfléchis est égale à 2,5 m. Dans le sens perpendiculaire, la distance entre deux points réfléchis est égale à 5 m. Les sections en profondeur ont été déconvoluées pour augmenter la résolution verticale. Elles ont ensuite été intégrées pour transformer un bloc 3D d'amplitude en un bloc de pseudo-vitesse, en utilisant des lois de vitesse (diagraphies acoustiques enregistrées dans les forages C1, MP5, MP6, M08, M09) comme contraintes. Les sections en pseudo-vitesse du bloc 3D ainsi obtenues ont été fusionnées avec celles obtenues par la tomographie en réfraction pour créer un modèle de vitesse 3D depuis la surface (figure 5.3).

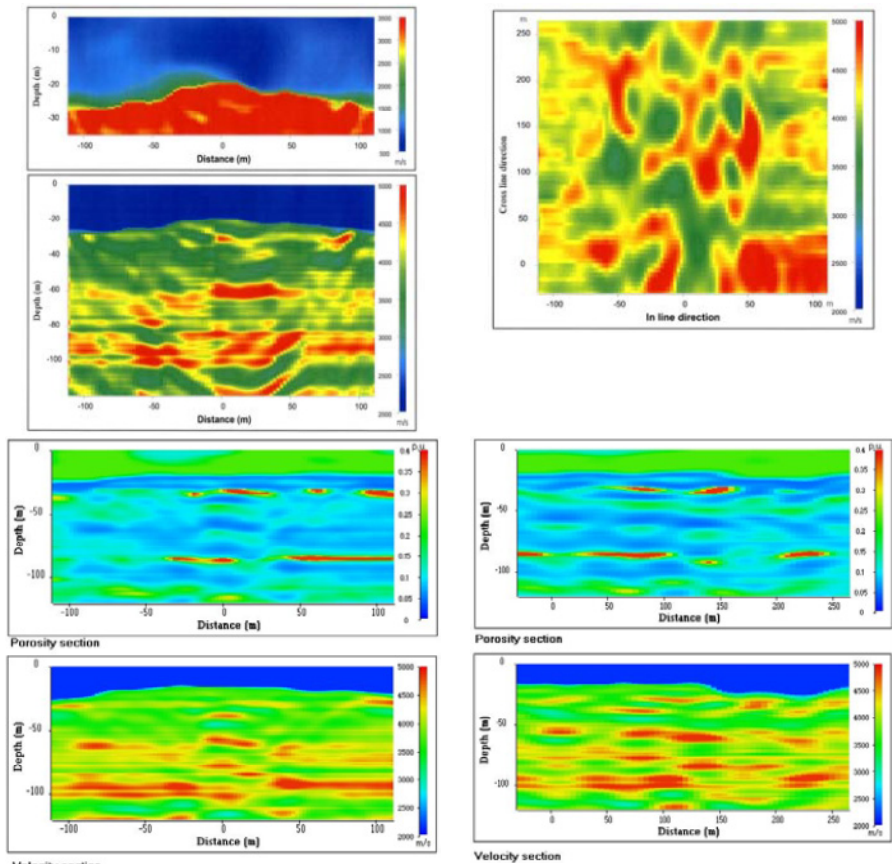


Figure 5.3 Traitement sismique 3D. En haut à gauche : in-line 31 section de pseudo-vitesse (partie supérieure : zoom dans l'intervalle de profondeur 0-35 m). En haut à droite : carte pseudo-vitesse à 87 m de profondeur. En bas à gauche : in-line 21 section en pseudo-vitesse et porosité. En bas à droite : crossline 24 section en pseudo-vitesse et porosité.

La figure 5.3 en haut à gauche montre les résultats obtenus pour la section sismique 31 (inline) extraite à partir du modèle de vitesse 3D. Elle montre également la carte de vitesse à 87 m de profondeur (figure 5.3, en haut à droite). Le modèle de vitesse 3D illustre la grande hétérogénéité de l'aquifère dans les plans horizontaux et verticaux. Afin de quantifier les variations de porosité au sein de cet aquifère, les vitesses de l'intervalle sismique ont été d'abord converties en valeurs de résistivité. À cette fin, la relation empirique proposée par Faust [10], entre la vitesse sismique et la résistivité, a été utilisée. Les valeurs de résistivité ont ensuite été converties en valeurs de porosité, en utilisant la loi d'Archie [11]. La figure 5.3 (en bas) montre respectivement le profil « inline » 21 et « crossline » 24, en pseudo vitesse et en porosité.

Le bloc sismique 3D de pseudo-porosité résultant a permis de mettre en évidence trois niveaux avec une porosité forte, à des profondeurs de 35-40, 85-87 et 110-115 m. Le niveau entre 85 et 87 m de profondeur est le plus poreux (supérieure à 30 %), or il correspond bien à la partie la plus karstifiée du réservoir. La figure 5.4 montre la distribution des corps poreux dans les intervalles de 80 à 90 et de 100 à 120 m.

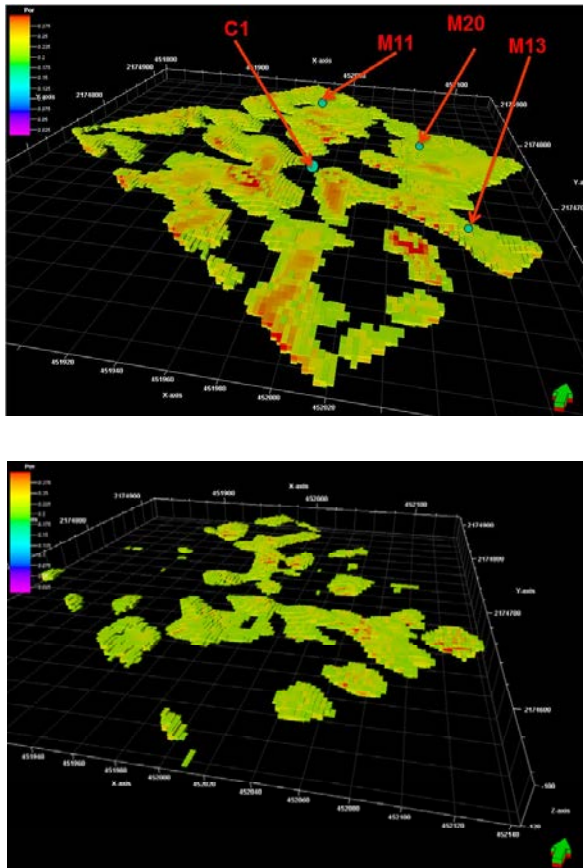


Figure 5.4 Répartition des niveaux karstifiés. En haut : carte dans l'intervalle de 80 à 90 m de profondeur. En bas : carte dans l'intervalle de 100 à 120 m de profondeur.

Le bloc 3D est composé de cellules élémentaires (2,5 m suivant la direction « inline », 5 m suivant la direction « crossline » et 1 m d'épaisseur) qui montrent clairement la connectivité des corps karstiques. Afin de valider localement les résultats obtenus par la sismique 3D, des diagraphies acoustiques en champ total et des PSV ont été enregistrés dans 11 forages, respectivement en 2014 et 2015. La diagraphie acoustique et le PSV ont une résolution verticale supérieure à celle de sismique 3D, mais une investigation latérale restreinte au voisinage du forage. Les 11 forages sélectionnés sont : C1, M03, M05, M11, M13, M14, M20, M22, MP5, MP6 et MP7.

Sur le papier, nous montrons les résultats obtenus dans les forages C1, M11, M13 et M20. L'emplacement des forages est indiqué sur les figures 5.1 et 5.4.

## 5.4 Mesures sismiques en forage

Pour l'acquisition PSV, la source sismique est une chute de poids accélérée et le récepteur en forage est un hydrophone. Le pas de mesure en profondeur est de 2,5 m. Avant chaque tir, le bruit ambiant a été enregistré. Les PSV, réalisés dans des forages en eau, sont fortement corrompus par des ondes de Stoneley (ondes de tube). Au niveau des karsts, la conversion d'une onde P descendante en une onde de Stoneley montante a également été observée. Ce phénomène se produit dans des formations hautement perméables.

La figure 5.5 montre les données enregistrées dans le forage C1. On peut identifier un phénomène de conversion d'ondes P en ondes de Stoneley à 60 m de profondeur (figure 5.5 en haut à droite). En effet, nous pouvons remarquer que la première arrivée qui est l'onde descendante P est fortement atténuée à 60 m de profondeur. À cette profondeur, l'onde P est en partie convertie en une onde descendante de Stoneley qui se réfléchit au fond du forage. Les données PSV ont été traitées pour extraire les ondes de Stoneley descendantes et montantes. L'onde descendante de Stoneley peut être extraite par un filtre de vitesse, la vitesse étant la vitesse apparente de l'onde de Stoneley. Un filtre avec une bande étroite de nombre d'onde appliqué après la correction de vitesse est équivalent à un filtre de vitesse dans le domaine  $f$ - $k$ . La vitesse est déterminée par un balayage des vitesses. Pour une valeur de vitesse donnée, l'onde de Stoneley et le résidu sont extraits. La différence entre les données PSV et l'estimation de l'onde de Stoneley est calculée. La vitesse choisie est la vitesse qui minimise les résidus. La vitesse apparente du mode Stoneley est de l'ordre de 1 300 mètres par seconde. La même procédure est appliquée pour extraire l'onde Stoneley montante, mais la vitesse apparente est négative. Une transformée de Hilbert a été appliquée aux différents champs d'onde pour estimer leur amplitude (enveloppe instantanée). La figure 5.5 (en bas à gauche) montre l'augmentation de l'amplitude des ondes de Stoneley. Les amplitudes instantanées des ondes de Stoneley montantes ont été additionnées dans un petit couloir situé après l'arrivée de l'onde P descendante, afin d'obtenir un facteur de conversion entre les ondes de volume et de Stoneley (figure 5.5, en bas à droite). Il apparaît qu'un pic de ce facteur est en lien avec un niveau karstique à une profondeur de 57 m.

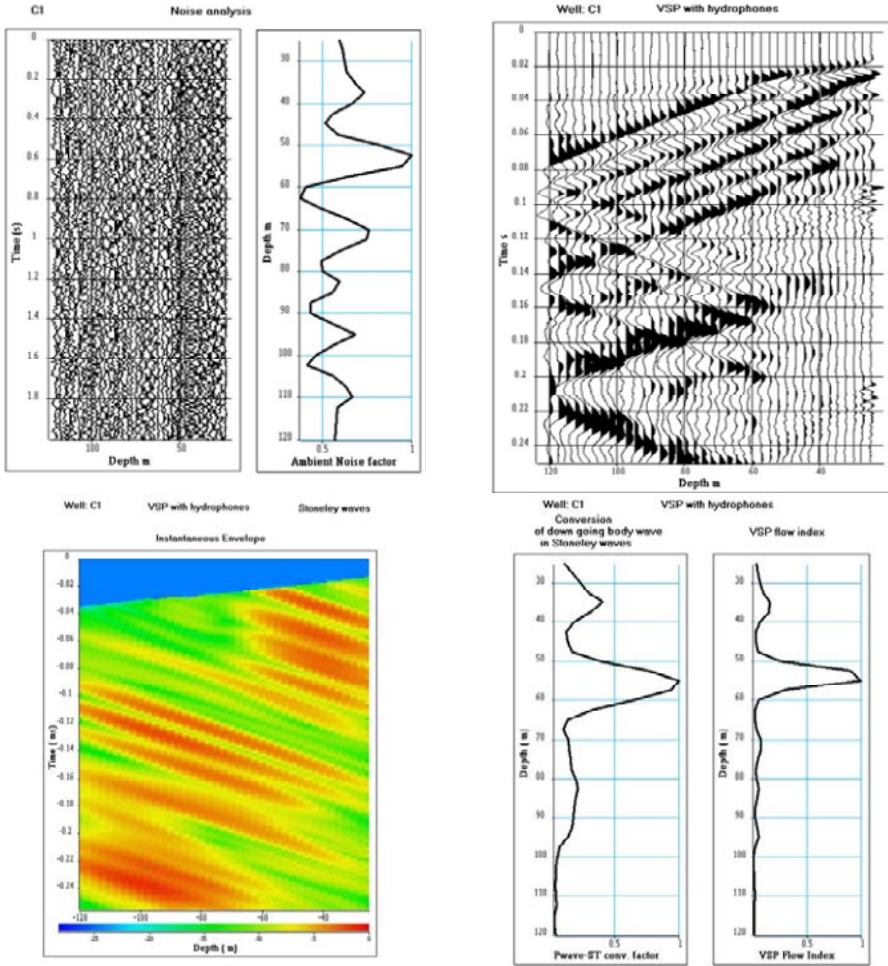
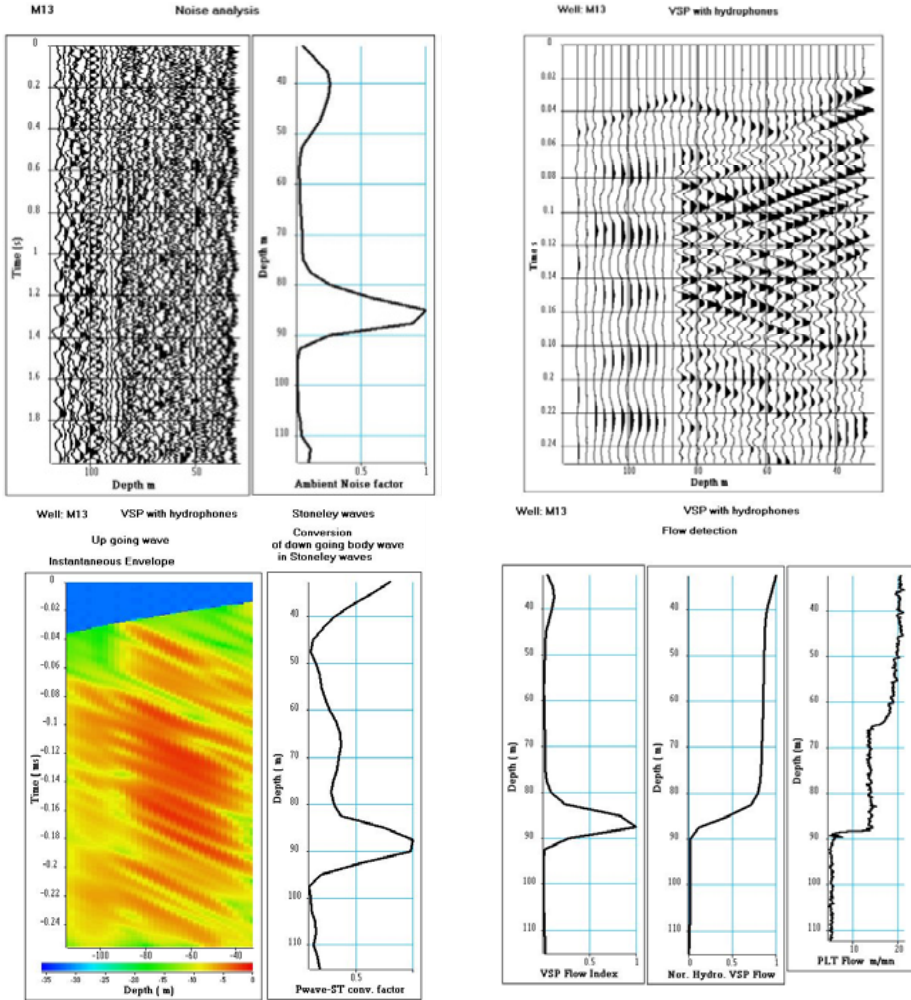


Figure 5.5 Détection de débit à l'aide de mesures de bruit ambiant et de données PSV dans le forage C1. En haut à gauche : bruit ambiant et facteur de bruit ambiant. En haut à droite : données PSV montrant un niveau élevé d'onde de Stoneley. En bas à gauche : ondes de Stoneley montantes (enveloppe instantanée). En bas à droite : facteur de conversion des ondes P en ondes de Stoneley et indice de débit PSV.

En supposant qu'un écoulement dans le réseau karstique génère une hausse du bruit ambiant [12], l'analyse du bruit sismique a été effectuée afin de détecter la présence d'un débit [13]. Pour cela, la moyenne et la variance du spectre d'amplitude de chaque trace de bruit ont été calculées. Nous pouvons effectivement noter une augmentation significative du facteur de bruit ambiant, défini comme le rapport entre la moyenne et la variance du spectre, au niveau des zones karstiques. L'analyse du bruit ambiant montre donc que les variations du facteur de bruit ambiant sont corrélées

avec le niveau de conversion des ondes P en ondes de Stoneley. La figure 5.5 (en haut à gauche) montre le bruit ambiant et le facteur de bruit ambiant. L'attribut, nommé indice de débit PSV, défini comme le produit du facteur de bruit ambiant par l'indice de conversion d'onde de volume en Stoneley (figure 5.5, en bas à droite) a été utilisé pour détecter les deux niveaux karstifiés et leur débit.



**Figure 5.6** Détection de débit à l'aide de mesures de bruit ambiant et de données PSV dans le forage M13. En haut à gauche : bruit ambiant et facteur de bruit ambiant. En haut à droite : données PSV montrant un niveau élevé d'onde de Stoneley. En bas à gauche : onde de Stoneley montante et facteur de conversion des ondes P en ondes de Stoneley. En bas à droite : détection du débit à 87 m de profondeur et comparaison du débit PSV avec le débit PLT.

L'analyse du bruit ambiant et de l'augmentation de la conversion d'ondes P en ondes de Stoneley est actuellement la seule façon que nous avons de détecter un débit dans le puits C1. En raison du petit diamètre du forage C1, il n'était pas possible d'y faire un log d'imagerie et de débit. Toutefois, le niveau karstique à 57 m de profondeur a été confirmé par l'enregistrement acoustique.

La même procédure a donc été appliquée pour les données du forage M13 (figure 5.6).

La figure 5.6 montre :

- en haut à gauche : le bruit ambiant et son facteur de bruit associé qui met en évidence un niveau karstique entre 85 et 87 m, et prédit un débit ;
- en haut à droite : les données PSV. On peut remarquer une onde de Stoneley descendante réfléchiée à une profondeur de 85 m. La conversion d'une onde P descendante en une onde de Stoneley montante et descendante est également observée à la même profondeur ;
- en bas à gauche : l'amplitude instantanée de l'onde de Stoneley montante et le facteur de conversion associé entre l'onde P et l'onde de Stoneley. Ce facteur confirme la présence d'un corps karstique entre 85 et 90 m ;
- en bas à droite : l'indice de débit du PSV prédit un débit entre 85 et 87 m. L'indice de débit du PSV a été intégré en profondeur de bas en haut pour imiter un débitmètre, afin de faire une comparaison avec un log PLT. On peut remarquer une bonne corrélation entre les 2 logs, en tenant compte du fait que la résolution verticale n'est pas la même pour les 2 logs (2,5 m pour le PSV et 1 cm pour le PLT).

La variation de débit sur le log PLT à la profondeur de 65 m est due à un changement de diamètre du forage.

## 5.5 Diagraphie acoustique monopole en champ total

La transmission d'une onde acoustique à travers les formations géologiques est utilisée pour les caractériser. Les outils de type monopôle sont les plus couramment utilisés.

Les sources monopôles et les récepteurs sont multidirectionnels. Les sources génèrent dans le fluide une compression qui crée dans la formation une onde de compression (onde P) et une onde de cisaillement (onde S) aux angles limites de réfraction. Dans un forage vertical, ces outils sont utilisés pour enregistrer cinq modes de propagation : l'onde de compression réfractée, l'onde de cisaillement réfractée (seulement dans les formations rapides), l'onde de fluide et deux ondes dispersives guidées : les ondes de pseudo Rayleigh (seulement dans les formations rapides) et les ondes de Stoneley. L'enregistrement d'un outil acoustique permet de mesurer des vitesses de propagation verticale et les fréquences des différentes ondes qui sont enregistrées.

L'enregistrement des ondes acoustiques de chaque récepteur de l'outil de diagraphie est utilisé pour calculer des logs supplémentaires, définis comme des attributs acoustiques et ils sont utiles pour la caractérisation de la formation, telle que : l'amplitude, l'indice de forme, la longueur d'onde et l'atténuation. L'outil acoustique utilisé pour l'expérience de terrain est un outil monopôle souple avec deux récepteurs décalés (déport R1 de 3 m et R2 de 3,25 m).

Au droit d'un niveau karstifié, on observe une forte atténuation de l'onde P réfractée et une distorsion du signal acoustique rendant difficile le pointé de l'arrivée des ondes P réfractées. Un traitement basé sur la décomposition en valeur singulière (SVD, [14]) est effectué indépendamment sur les deux sections à déport constant. Le temps de l'onde réfracté est donné par la première section d'Eigen obtenue par SVD :

$$\underline{t}^{\text{sig}} = \lambda_1 \underline{u}_1 \underline{v}_1^T \quad 1$$

$v_1$  est le premier vecteur singulier donnant la dépendance temporelle, donc appelé ondelette normalisée,  $u_1$  est le premier vecteur singulier donnant l'amplitude en profondeur, donc appelé vecteur de propagation et  $\lambda_1$  la valeur propre associée. La variation d'amplitude de l'ondelette réfractée sur l'intervalle de profondeur est  $\lambda_1 u_1$ .

Une fonction de coût basée sur la corrélation des ondelettes normalisées  $V_1$  extraites des deux sections à déport constant permet de calculer simultanément la vitesse  $V$  de la formation et le coefficient de corrélation entre les ondelettes.

Le traitement SVD conduit à calculer un attribut spécifique utilisé pour détecter les niveaux karstiques. L'attribut, nommé détecteur acoustique de bruit, est le produit de trois termes normalisés :

- un terme de vitesse :  $CV = 1 - (V/V_{\text{max}})$ . Plus faible est la vitesse, plus grande est le terme de vitesse. Dans les zones karstiques, on observe un coefficient CV élevé ;
- un terme d'amplitude :  $CA = 1 - (A/A_{\text{max}})$ , avec  $A = \lambda_1 u_1$ . Dans les zones karstiques, on observe un coefficient CA élevé ;
- un terme de corrélation :  $CCor = 1 - (Cor/Cor_{\text{max}})$ , Cor étant le coefficient de corrélation entre deux ondelettes normalisées. Dans les zones karstiques, on observe un coefficient CCor élevé.

La figure 5.7 montre les données acoustiques du puits M13. Sur la section à déport constant de 3 m, nous pouvons voir clairement :

- les ondes P réfractées entre 0,5 et 1 milliseconde ;
- les ondes de cisaillement réfractées converties entre 1,2 et 1,8 milliseconde ;
- les modes Stoneley après 2 millisecondes.

On peut remarquer une forte atténuation de toutes les ondes entre 85 et 90 m, mise en évidence par le log du détecteur acoustique de bruit. L'imagerie BHTV confirme la présence d'un niveau karstique. Les résultats sont cohérents avec les mesures sismiques (indice de débit PSV) et le débit du PLT (figure 5.6).

5. Exemple de caractérisation d'un aquifère karstique à l'aide des méthodes sismiques

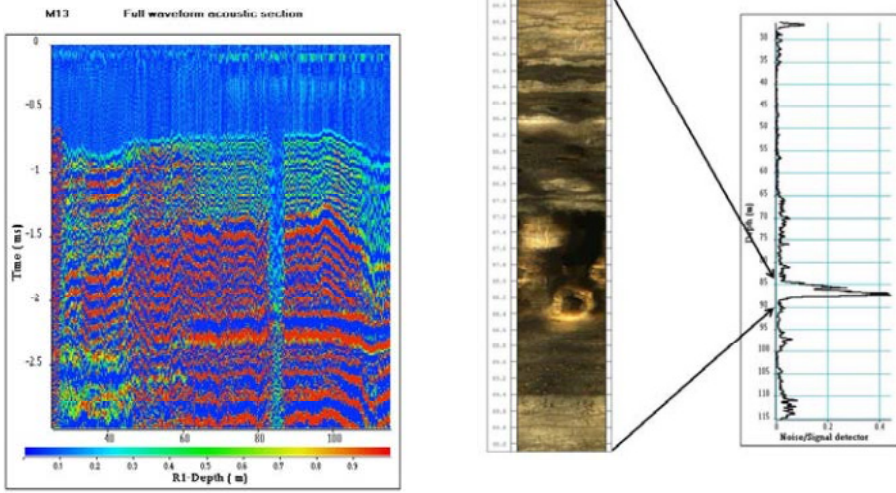


Figure 5.7 *Diagraphie acoustique du forage M13. Section acoustique (à gauche) et comparaison entre imagerie de paroi et détecteur de bruit/signal (à droite).*

La figure 5.8 illustre la comparaison entre le log OPTV, l'indice de débit PSV, le détecteur acoustique de bruit et le débit du PLT dans le forage M11. Nous détectons clairement un niveau karstique avec une circulation, entre 85 et 90 m.

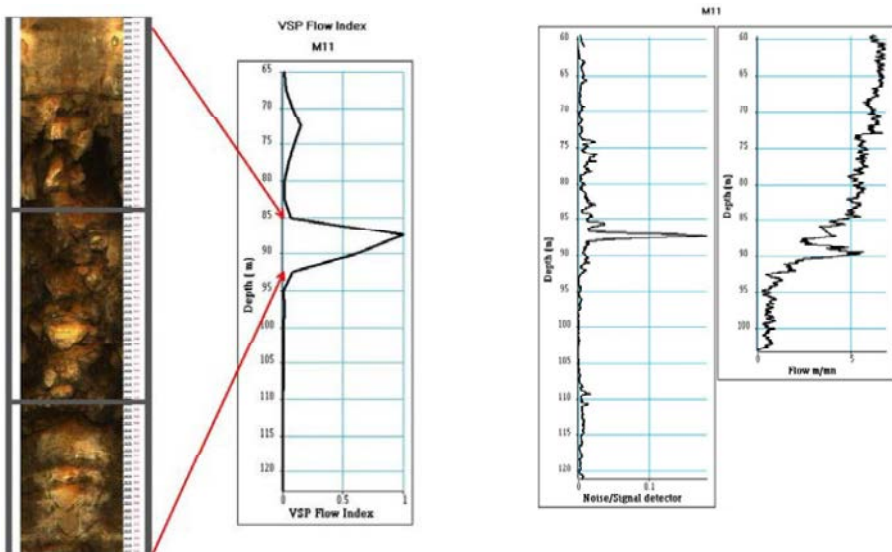


Figure 5.8 *Détection de débit dans le forage M11. Comparaison entre imagerie de paroi, indice de flux PSV, détecteur bruit/signal (enregistrement acoustique) et débitmétrie PLT.*

La figure 5.9 est une synthèse des méthodes développées pour détecter les niveaux karstiques et quantifier les débits. Elle regroupe les données des diagraphies acoustiques, le bruit sismique ambiant et les données PSV, l'imagerie OPTV et les débit-métries PLT.

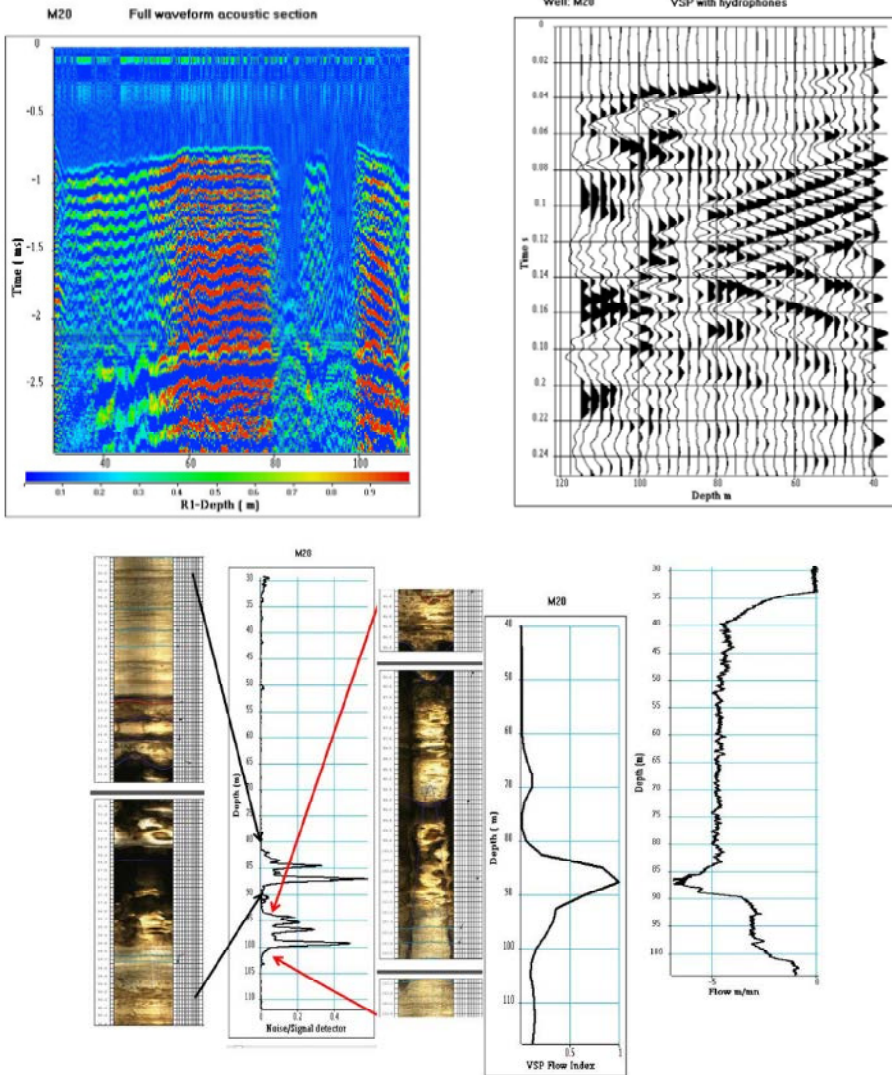


Figure 5.9 Détection de débit dans le forage M20. En haut : données acoustiques en champ total (à gauche) et données PSV (à droite). En bas : comparaison entre imagerie OPTV, détecteur acoustique de bruit, indice de débit PSV et log PLT.

Considérons les données enregistrées dans le forage M20. Sur l'enregistrement acoustique à départ constant de 3 m, nous voyons :

- les ondes P réfractées entre 0,5 et 1 milliseconde ;
- localement les ondes de cisaillement réfractées entre 1,2 et 1,8 milliseconde ;
- les ondes fluides, caractérisées par des fréquences très élevées de l'ordre de 30 kHz ;
- les modes des ondes de Stoneley.

L'analyse des données acoustiques et le calcul du détecteur acoustique de bruit ont permis de détecter des niveaux karstiques à deux intervalles de profondeurs, entre 82 et 88 mètres et entre 95 et 100 mètres. Sur la section acoustique, dans ces intervalles, on peut voir une forte atténuation de l'onde P réfractée. La présence de ces deux niveaux karstiques est validée par les logs d'imagerie OPTV.

Le PSV montre un mode Stoneley descendant qui est fortement atténué à 82,5 m de profondeur. Nous observons les phénomènes de conversion d'une onde P descendante en onde de Stoneley entre 82,5 et 100 m. Le traitement des données PSV et l'analyse du bruit ambiant confirment que l'intervalle de profondeur de 82,5 à 100 m est un niveau karstifié et producteur. Un log PLT réalisé durant un pompage dans le puits M04 valide les résultats précédents.

## 5.6 Conclusion

Ce chapitre a montré l'avantage de combiner différentes méthodes géophysiques pour décrire des formations géologiques à différentes échelles. L'aquifère étudié est une formation calcaire karstifiée, entre 20 et 130 m de profondeur.

En 2004, une campagne de sismique réflexion et réfraction a été réalisée sur le site d'étude [1]. Une analyse de la sismique réfraction par tomographie a été faite pour calculer la distribution des vitesses dans la couverture de l'aquifère karstique et pour cartographier le toit de ce réservoir. Les données de sismique réflexion 3D ont été traitées pour obtenir, après inversion, la répartition des vitesses sismiques dans le réservoir. Le résultat est un bloc sismique 3D de haute résolution. Il permet d'identifier trois niveaux vraisemblablement producteurs avec une porosité élevée aux profondeurs comprises entre 35 et 40 m, 85 et 87 m puis 110 et 115 m. Le niveau le plus poreux est entre les profondeurs de 85 et 87 m, avec plus de 30 % de porosité, ce qui représente bien la partie la plus karstifiée du réservoir.

Afin de valider localement les résultats obtenus par la sismique 3D, des diagraphies acoustiques en champ total et des PSV ont été enregistrés dans 11 forages. Les PSV et les diagraphies acoustiques ont une résolution verticale plus élevée que la sismique de surface.

Une méthodologie a été développée pour détecter un débit dans des niveaux aquifères en utilisant à la fois la mesure du bruit ambiant et les données PSV enregistrées

avec un hydrophone. Les PSV, enregistrés dans des forages en eau, sont fortement pollués par les ondes de Stoneley (ondes de tube). La conversion d'une onde P descendante en ondes de Stoneley a été observée sur des niveaux karstifiés. Ce phénomène se produit dans des formations hautement perméables. L'analyse du bruit ambiant montre que les variations de ses caractéristiques (variance spectrale) sont corrélées avec le niveau de conversion de l'onde P en ondes de Stoneley. Un attribut, appelé indice de débit PSV, a été calculé pour détecter les deux niveaux karstiques et les débits.

Des diagrapies acoustiques en champ total ont été enregistrées à la fois pour valider localement les résultats obtenus par les méthodes sismiques (3D et PSV) et pour évaluer le potentiel des méthodes acoustiques pour détecter des niveaux karstiques à très haute résolution (0,25 m profondeur). Une méthodologie a également été développée pour exploiter les données acoustiques générées par des écoulements dans les conduits karstiques. La méthodologie est basée sur une décomposition en valeur singulière qui est utilisée pour estimer simultanément la vitesse de la formation, l'amplitude du signal acoustique et le niveau de bruit. Un attribut, appelé détecteur acoustique de bruit, a été calculé pour détecter les niveaux karstiques.

Les données sismiques (3D, PSV) et les diagrapies acoustiques ont été comparées avec les enregistrements d'imagerie OPTV des débitmètres PLT. Les débits prédits par les méthodes sismiques sont confirmés par les logs PLT.

Les conclusions de l'étude sont les suivantes :

- le bloc sismique 3D peut être utilisé pour construire un modèle 3D d'aquifères karstiques ;
- sur les données PSV, une conversion d'onde P en ondes de Stoneley est observée au toit des niveaux producteurs ;
- les variations des caractéristiques spectrales du bruit sismique ambiant sont fortement corrélées avec les débits mesurés (PLT) et la conversion de l'onde P en ondes de Stoneley ;
- l'analyse du bruit acoustique ambiant et la conversion des ondes de volume en ondes de Stoneley peuvent aussi être utilisées pour détecter un écoulement.

Donc, on peut conclure que la sismique 3D, les diagrapies acoustiques en champ total, le PSV permettent la caractérisation des formations karstiques à différentes échelles.

## 5.7 Remerciements

Nous remercions l'université de Poitiers pour l'autorisation d'utiliser les données. Nous remercions Benoît Nauleau et Denis Paquet pour leur support technique. Nous remercions Patrick Meynier pour l'aide dans l'acquisition des données PSV. Nous remercions Pierre Gaudiani pour l'acquisition de diagrapies acoustiques en champ total.

## Références

- [1] Mari J.L., Porel G., 2007, 3D seismic imaging of a near – surface heterogeneous aquifer: a case study, *Oil and Gas Science and Technology, Rev IFP* 63, 179-201. doi: 10.2516/ogst/2007077.
- [2] Bernard S., Delay F., Porel G., 2006, A new method of data inversion for the identification of fractal characteristics and homogenization scale from hydraulic pumping tests in fractured aquifers. *Journal of Hydrology* 328, 647-658.
- [3] Kaczmaryk A., Delay F., 2007a, Interpretation of interference pumping tests in fractured limestone by means of dual-medium approaches. *Journal of Hydrology* 337, 133-146. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.01.004.
- [4] Kaczmaryk A., Delay F., 2007b, Improving dual-porosity-medium approaches to account for karstic flow in a fractured limestone. Application to the automatic inversion of hydraulic interference tests. *Journal of Hydrology* 347, 391-403. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.09.037.
- [5] Bourbiaux B., Callot J.P., Doligez B., Fleury M., Gaumet F., Guiton M., Lenormand R., Mari J.L., Pourpak H., 2007, Multi-Scale Characterization of a Heterogeneous aquifer through the Integration of Geological, Geophysical and Flow Data: A Case Study, *Oil and Gas Science and Technology, Rev IFP* 61, 347-373.
- [6] Mari J.L., Delay F., 2011, Contribution of Seismic and acoustic methods to reservoir model building, in: *Hydraulic Conductivity/Book 1*, InTech-Open Access Publisher. doi: 10.5772/22051.
- [7] Mari J.L., Mendes M., 2012, High resolution near surface imaging of fracture corridors and cavities by combining Plus Minus method and refraction tomography, *Near Surface Geophysics*, 10, 185-195. doi: 10.3997/1873-0604.2011052.
- [8] Hagedoorn G.J., 1959, The Plus-Minus method of interpreting seismic refraction sections, *Geophysical Prospecting* 7, 158-182.
- [9] Mari J.L., Porel G., Bourbiaux B., 2009, From 3D Seismic to 3D Reservoir Deterministic Model Thanks to Logging Data: the Case Study of a Near Surface Heterogeneous Aquifer, *Oil and Gas Science and Technology, Rev IFP* 64, 119-131. doi: 10.2516/ogst/2008049.
- [10] Faust L.Y., 1953, A velocity function including lithologic variation, *Geophysics*, 18, 271-288.
- [11] Archie G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Petroleum Technology*, 146, 54-62.
- [12] Aslanyan A., Davydov D., 2012, Spectral Noise Logging, SNL-6, Technical overview, TGT Oilfield Services, [www.tgtoil.com](http://www.tgtoil.com)

- [13] Mari J.L., Porel G., 2016, Flow detection using well seismic data, Tu P2 02, 78<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition, Vienna, Austria, 30 May-2 June.
- [14] Mari J.L., Porel G., 2015, Automated karstic reservoir analysis utilizing attributes, We N117 02, 77<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition, Madrid IFEMA, Spain, 1-4 June.